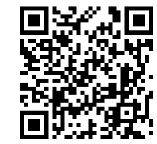
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.6 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-4-437-445

Моделирование биогеохимических процессов в Азовском море с использованием статистически обработанных данных о речном стоке



А. И. Сухинов[1], **Ю. В. Белова**[1], **А. В. Никитина**[2], **А. М. Атаян**[1]
[1] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2] ООО «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров» (г. Таганрог, Российская Федерация)

Введение. Работа посвящена численному решению задач динамики фитопланктона в прибрежных системах на примере Азовского моря. При этом учитывается трансформация форм фосфора, азота и кремния, а также движение водной среды, распределение температур и соленостей по акватории моря. Речной сток, меняясь по объему и по химическому составу, существенно влияет на изменчивость гидрофизических и биогеохимических параметров процессов, происходящих в прибрежной системе. Этим обусловлена необходимость статистической обработки данных многолетних наблюдений за характеристиками речного стока.

Материалы и методы. Математическая модель биогеохимических циклов основана на системе нестационарных уравнений конвекции — диффузии — реакции параболического типа с нелинейными функциями источников и младшими производными, к которой добавлены соответствующие начальные и граничные условия. В ходе статистического анализа рядов многолетних наблюдений за стоками рек найдены значения следующих показателей: коэффициенты асимметрии, эксцесса, дисперсия и стандартное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент автокорреляции, отношение Неймана и критерий Андерсона.

Результаты исследования. Статистический анализ рядов многолетних наблюдений за гидрохимическими показателями реки Дон свидетельствует о неоднородности натурных данных. Это связано со стохастичностью поступлений биогенных веществ и объема пресноводного стока в море в результате воздействия природных и антропогенных факторов. Натурные данные целесообразно соотносить с сезонными изменениями температуры водной среды. В работе представлены результаты вычислительного эксперимента по моделированию динамики фитопланктонных популяций в летний период, когда температуры благоприятны для их размножения и роста. Предложенная математическая модель учитывает пространственно-неоднородное распределение и трансформации форм фосфора, азота и кремния, а также изменения солености, температуры и движения водной среды.

Обсуждение и заключения. Рассмотрена многовидовая математическая модель динамики фитопланктонных популяций с учетом трансформации форм фосфора, азота и кремния в прибрежных системах. Проведен анализ данных натурных наблюдений, для чего рассчитаны его основные статистические параметры. В итоге сделан вывод о существенной изменчивости данных многолетних наблюдений. Это обусловлено двумя причинами. Первая: случайный характер поступления биогенных веществ и объемов стока рек в результате воздействия антропогенных факторов. Вторая: чередование в последние 12–15 лет относительно многоводных и маловодных периодов по пресному стоку. Гидрологический режим меняется главным образом за счет сокращения среднегодового пресноводного стока Дона и частично Кубани. Эта тенденция, по-видимому, будет усиливаться из-за климатических изменений, а также при дальнейшем регулировании стока Дона после ввода Багаевского гидроузла. Численные эксперименты на основе натурных данных подтвердили предсказательную ценность разработанных моделей и программ. С их помощью можно прогнозировать изменение состава и численности (концентраций) в Азовском море основных планктонных популяций, которые определяют, с одной стороны, кормовую базу, а с другой — состояние водной среды в условиях продолжающегося осолонения моря.

Ключевые слова: биогеохимические циклы, фитопланктонная популяция, биогенное вещество, химико-биологический источник, уравнение конвекции — диффузии — реакции, натурные данные.

Для цитирования: Моделирование биогеохимических процессов в Азовском море с использованием статистически обработанных данных о речном стоке / А. И. Сухинов, Ю. В. Белова, А. В. Никитина, А. М. Атаян // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 4. — С. 437–445. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-4-437-445

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-01-00421.



Modeling biogeochemical processes in the Azov Sea using statistically processed data on river flow

A. I. Sukhinov[1], Y. V. Belova[1], A. V. Nikitina[2], A. M. Atayan[1]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Supercomputers and Neurocomputers Research Center (Taganrog, Russian Federation)

Introduction. This work is aimed at solving the problem of phytoplankton dynamics in the coastal environments using the example of the Azov Sea. This takes into account the transformation of forms of phosphorus, nitrogen and silicon, as well as the aquatic medium motion, the distribution of temperatures and salinities over the sea area. River flow, varying in volume and chemical composition, affects significantly the variability of hydrophysical and biogeochemical parameters of the processes occurring in the coastal environment. This explains the need for statistical processing of the data from long-term observations over the river flow characteristics.
Materials and Methods. The mathematical model of biogeochemical cycles is based on a system of non-stationary equations of the convection–diffusion–reaction of parabolic type with nonlinear functions of sources and lower-order derivatives, to which the corresponding initial and boundary conditions are added. In the course of statistical analysis of the series of long-term observations over river flows, the values of the following indicators were found: skewness coefficient, degree of kurtosis, variance and standard deviation, coefficient of variation, autocorrelation coefficient, Neumann ratio, and Anderson criterion.
Results. The statistical analysis of the series of long-term observations over the hydrochemical indicators of the Don river suggests heterogeneity of the field data. This is due to the stochasticity of nutrient inputs and the volume of freshwater flow to the sea as a result of natural and anthropogenic factors. Field data should be correlated with seasonal changes in the aquatic environment temperature. This paper presents the results of a computational experiment to model the dynamics of phytoplankton populations in summer season, when temperatures are favorable for their reproduction and growth. The proposed mathematical model considers the spatially inhomogeneous distribution and transformation of forms of phosphorus, nitrogen, and silicon, as well as changes in salinity, temperature, and motion of the aquatic environment.
Discussion and Conclusions. The multispecies mathematical model of the dynamics of phytoplankton populations is considered with account for the transformation of forms of phosphorus, nitrogen, and silicon in the coastal environments. The analysis of data from field observations, for which its major statistical parameters are calculated, is carried out. As a result, it is concluded that data of the long-term observations are significantly variable. This is due to two reasons. Random nature of the input of nutrients and the volume of river flow as a result of anthropogenic factors is the first reason. The second reason includes the alternation of relatively high-water and low-water periods for fresh flow over the last 12-15 years. The hydrological regime is changing mainly due to the reduction of the average annual freshwater flow of the Don and partly of the Kuban. This trend is likely to increase due to climate changes, as well as with further regulation of the Don river flow after the Bagaevsky hydroelectric installation start-up. Numerical experiments based on the field data confirmed the predictive validity of the developed models and programs. They can be used to predict change in the composition and abundance (concentrations) in the Azov sea core planktonic populations, which define, on the one hand, food resources, and, on the other hand, the aquatic environment in terms of the ongoing sea salinization.

Keywords: biogeochemical cycles, phytoplankton population, biogenic substance, chemical-biological source, convection–diffusion–reaction equation, field data.

For citation: A. I. Sukhinov, Y. V. Belova, A. V. Nikitina, et al. Modeling biogeochemical processes in the Azov Sea using statistically processed data on river flow. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 437–445. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-4-437-445

Funding information: the research is done with the financial support from RFFI (project no. 20-01-00421).

Введение. Азовское море — крупная прибрежная система эстуарного типа. Это самое мелкое море в мире. Оно почти равномерно прогревается летом (с перепадами температуры в среднем не более 4 °C). При этом характеризуется большим перепадом солености — от 0 ‰ до 12–15 ‰, т. к. стоки рек обеспечивают приток пресной воды, соизмеримый с общим объемом вод моря, а из Черного моря в районе Керченского пролива поступает соленая черноморская вода. Речной сток существенно влияет на биохимический состав водоема [1]. Представляется актуальным математическое моделирование биогеохимических процессов, позволяющее проводить диагностические и прогностические расчеты динамики экосистемы моря. Изменчивый по объему и по гидрохимическому составу речной сток заметно влияет на параметры гидрофизических и биологических процессов, происходящих в прибрежной системе. Поэтому целесообразно провести статистический анализ данных многолетних наблюдений, в частности гидрохимических показателей стока рек, впадающих в Азовское море, и на основе статистически обработанных входных данных выполнить прогнозирование биогеохимических процессов.

В области исследования гидродинамики и прогнозирования морских систем следует отметить работы Марчука Г. И. [2], Матишова Г. Г., Сухинова А. И. [3], Бердникова С. В., Тютюнова Ю. В. [4], Якушева Е. В. [5], Ильичева В. Г. и др. В статье представлены результаты комплексирования математической модели биогеохимических циклов с моделью гидродинамики Азовского моря [6–8]. Это позволяет повысить точность моделирования и учесть такие факторы, как гидродинамические процессы в прибрежных системах, неоднородное распределение температур, соленостей и биогенных веществ, влияющих на развитие фитопланктонных популяций, переход биогенов из одной формы в другую [9]. Следует заметить, что численные модели пространственно-трехмерных гидрофизических процессов в прибрежных системах являются предметом отдельного исследования авторского коллектива. Они дают возможность учесть динамически изменяющуюся геометрию дна и береговой линии, ветровое напряжение на свободной поверхности и ее возвышение, трение о дно, силу Кориолиса, турбулентный обмен, испарение, речные стоки, отклонение значений давления в водной среде от гидростатического приближения и др. В представленной работе входные данные (распределение трехмерного вектора скоростей, а также соленостей и температур) являются результатами численных расчетов на основе гидрофизической модели [10].

Материалы и методы. Для описания модели формулируется начально-краевая задача для системы уравнений параболического типа с младшими производными и нелинейными функциями правых частей:

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + u\frac{\partial q_i}{\partial x} + v\frac{\partial q_i}{\partial y} + w\frac{\partial q_i}{\partial z} = div(k\mathrm{grad}q_i) + R_{q_i}, \tag{1}$$

где q_i — концентрация i-й компоненты [мг/л]; $i\in M$, $M = \{F_1, F_2, F_3, PO_4, POP, DOP, NO_3, NO_2, NH_4, Si\}$; $\{u, v, w\}$ — компоненты вектора скорости водного потока [м/с]; k — коэффициент турбулентного обмена [м^2/с]; R_{q_i} — функция — источник биогенных веществ [мг/(л·с)].

В уравнении (1) индекс i указывает на вид субстанции (таблица 1).

Таблица 1

Биогенные вещества в модели динамики фитопланктона

Номер	Обозначение	Название
1	F_1	Зеленая водоросль *Chlorella vulgaris*
2	F_2	Сине-зеленая водоросль *Aphanizomenon flos-aquae*
3	F_3	Диатомовая водоросль *Sceletonema costatum*
4	PO_4	Фосфаты
5	POP	Взвешенный органический фосфор
6	DOP	Растворенный органический фосфор
7	NO_3	Нитраты
8	NO_2	Нитриты
9	NH_4	Аммоний
10	Si	Растворенный неорганический кремний (кремниевые кислоты)

Химико-биологические источники описаны следующими уравнениями ($i \in \{1,2,3\}$, где 1 — это ChV , 2 — $AF - A$, 3 — Sc , а $ChV, AF - A, Sc$ — символические обозначения видов планктона):

$$R_{F_i} = C_{F_i}(1 - K_{F_iR})q_{F_i} - K_{F_iD}q_{F_i} - K_{F_iE}q_{F_i},\ i = \overline{1,3},$$

$$R_{POP} = \sum_{i=1}^{3} s_p K_{F_iD} q_{F_i} - K_{PD} q_{POP} - K_{PN} q_{POP},$$

$$R_{DOP}=\sum_{i=1}^{3}s_P K_{F_iE}q_{F_i}+K_{PD}q_{POP}-K_{DN}q_{DOP},$$

$$R_{PO_4}=\sum_{i=1}^{3}s_P C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)q_{Fi}+K_{PN}q_{POP}+K_{DN}q_{DOP},$$

$$R_{NH_4}=\sum_{i=1}^{3}s_N C_{F_1}\left(K_{F_iR}-1\right)\frac{f_N^{(2)}\left(q_{NH_4}\right)}{f_N\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)}q_{F_i}+\sum_{i=1}^{3}S_N\left(K_{F_iD}+K_{F_iE}\right)q_{F_i}-K_{42}q_{NH_4},$$

$$R_{NO_2}=\sum_{i=1}^{3}s_N C_{F_i}(K_{F_iR}-1)\frac{f_N^{(1)}\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)}{f_N\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)}\cdot\frac{q_{NO_2}}{q_{NO_2}+q_{NO_3}}q_{F_i}+K_{42}q_{NH_4}-K_{23}q_{NO_2},$$

$$R_{NO_3}=\sum_{i=1}^{3}s_N C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)\frac{f_N^{(1)}\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)}{f_N\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)}\cdot\frac{q_{NO_3}}{q_{NO_2}+q_{NO_3}}q_{F_i}+K_{23}q_{NO_2},$$

$$R_{Si}=s_{Si}C_{F_3}\left(K_{F_3R}-1\right)q_{F_3}+s_{Si}K_{F_3D}q_{F_3}.$$

Здесь K_{F_iR} — удельная скорость дыхания фитопланктона; K_{F_iD} — удельная скорость отмирания фитопланктона; K_{F_iE} — удельная скорость экскреции фитопланктона; K_{PD} — удельная скорость автолиза *POP*; K_{PN} — коэффициент фосфатофикации *POP*; K_{DN} — коэффициент фосфатофикации *DOP*; K_{42} — удельная скорость окисления аммония до нитритов в процессе нитрификации; K_{23} — удельная скорость окисления нитритов до нитратов в процессе нитрификации; s_P, s_N, s_{Si} — нормировочные коэффициенты между содержанием *N*, *P*, *Si* в органическом веществе [11–12].

Скорость роста фитопланктона определяется выражениями

$$C_{F_{1,2}}=K_{NF_{1,2}}f_T(T)f_S(S)min\left\{f_P\left(q_{PO_4}\right),f_N\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)\right\},$$

$$C_{F_3}=K_{NF_3}f_T(T)f_S(S)min\left\{f_P\left(q_{PO_4}\right),f_N\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right),f_{Si}\left(q_{Si}\right)\right\},$$

где K_{NF} — максимальная удельная скорость роста фитопланктона.

Зависимости температуры и солености:

$$f_T(T)=\exp\left(-\alpha\left(\frac{T-T_{opt}}{T_{opt}}\right)^2\right),\ f_S(S)=\exp\left(-\beta\left(\frac{S-S_{opt}}{S_{opt}}\right)^2\right),$$

где T_{opt}, S_{opt} — температура и соленость, оптимальные для данного вида фитопланктона; $\alpha>0$, $\beta>0$ — коэффициенты ширины интервала толерантности фитопланктона к температуре и солености соответственно.

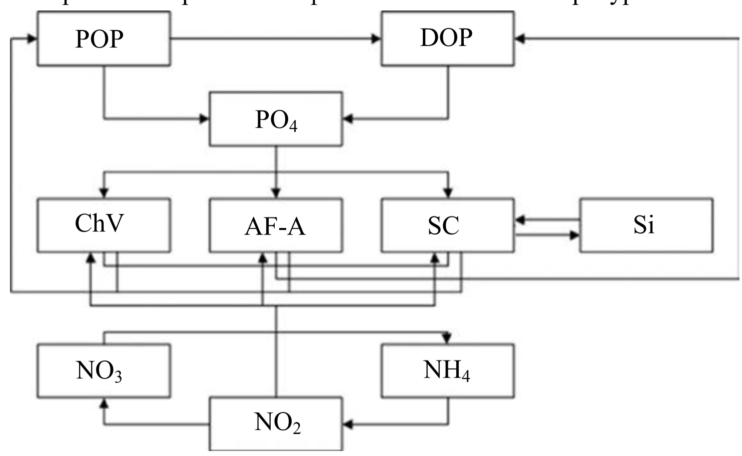


Рис. 1. Модельная схема биогеохимической трансформации форм фосфора, азота и кремния

Ниже представлены функции, описывающие содержание биогенов.

Для фосфора $f_P\left(q_{PO_4}\right)=\frac{q_{PO_4}}{q_{PO_4}+K_{PO_4}}$, где K_{PO_4} — константа полунасыщения фосфатами.

Для кремния $f_{Si}\left(q_{Si}\right)=\frac{q_{Si}}{q_{Si}+K_{Si}}$, где K_{Si} — константа полунасыщения кремнием.

Для азота $f_N\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)=f_N^{(1)}\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)+f_N^{(2)}\left(q_{NH_4}\right)$,

$$f_N^{(1)}(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4})=\frac{(q_{NO_3}+q_{NO_2})\exp(-K_{psi}q_{NH_4})}{K_{NO_3}+(q_{NO_3}+q_{NO_2})},\ f_N^{(2)}(q_{NH_4})=\frac{q_{NH_4}}{K_{NH_4}+q_{NH_4}},$$

где K_{NO_3} — константа полунасыщения нитратами; K_{NH_4} — константа полунасыщения аммонием; K_{psi} — коэффициент ингибирования аммония.

Предположим, что коэффициенты, входящие в выражения для функций источников, положительны и не зависят от времени *t*.

Для системы (1) ставится начально-краевая задача в цилиндрической области G. Пусть граница Σ цилиндрической области G является кусочно-гладкой поверхностью и $\Sigma = \Sigma_H \cup \Sigma_o \cup \sigma$, где Σ_H — поверхность дна водоема, Σ_o — невозмущенная поверхность водной среды, σ — боковая (цилиндрическая) поверхность.

Пусть u_{n} — нормальная по отношению к Σ составляющая вектора скорости водного потока, n — вектор внешней нормали к Σ. Допустим для концентраций q_i на боковой границе:

$$q_i = 0, \text{ на } \sigma, \text{ если } u_n < 0,\ i \in M; \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial n} = 0, \text{ на } \sigma, \text{ если } u_n \ge 0,\ i \in M; \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial z} = 0, \text{ на } \Sigma_o \text{ — поверхность водоема}, i \in M; \quad (4)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial z} = \varepsilon_{1,i} q_i,\ i \in \{F_1, F_2, F_3\}, \frac{\partial q_i}{\partial z} = \varepsilon_{2,i} q_i;$$

$$i \in \{PO_4, POP, DOP, NO_3, NO_2, NH_4, Si\} \text{ на дне } \Sigma_H. \quad (5)$$

Здесь $\varepsilon_{1,i}$, $\varepsilon_{2,i}$ — неотрицательные постоянные; $\varepsilon_{1,i}$, $i \in \{F_1, F_2, F_3\}$ учитывают опускание водорослей на дно и их затопление; $\varepsilon_{2,i}$, $i \in \{PO_4, POP, DOP, NO_3, NO_2, NH_4, Si\}$ учитывают поглощение питательных веществ донными отложениями.

Для системы уравнений необходимо в любой момент времени задавать вектор скоростей водного потока, поле солености и температуры, а также начальные значения функций q_i:

$$q_i(x,y,z,0) = q_{0i}(x,y,z), \quad (x,y,z) \in \overline{G},\ t = 0,\ i \in M, \quad (6)$$

$$\mathrm{V}(x,y,z,0) = \mathrm{V}_0(x,y,z),\ T(x,y,z,0) = T_0(x,y,z),\ S(x,y,z,0) = S_0(x,y,z).$$

Статистическая обработка данных многолетних наблюдений о стоках рек в Азовское море. Значительный относительно объемов моря речной сток существенно влияет на биологические и гидрофизические процессы, происходящие в Азовском море [13]. Со стоками рек в водоем поступает большое количество биогенных веществ, в том числе азота, фосфора и кремния — основных питательных элементов для фитопланктона. В XX веке основная часть притока вод в Азовское море приходится на сток Дона — 63 % (рис. 2–4)[1].

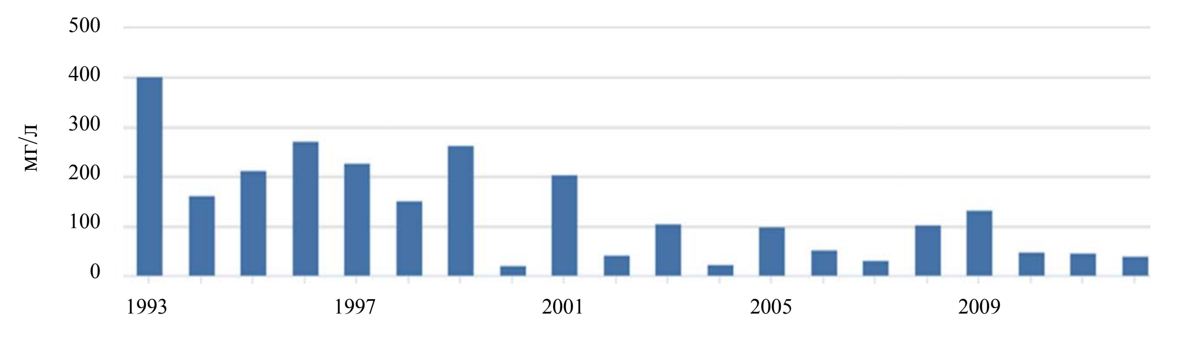


Рис. 2. Ряды многолетних наблюдений за стоком реки Дон (1993–2012 гг.): концентрация азота (N–NH_4)

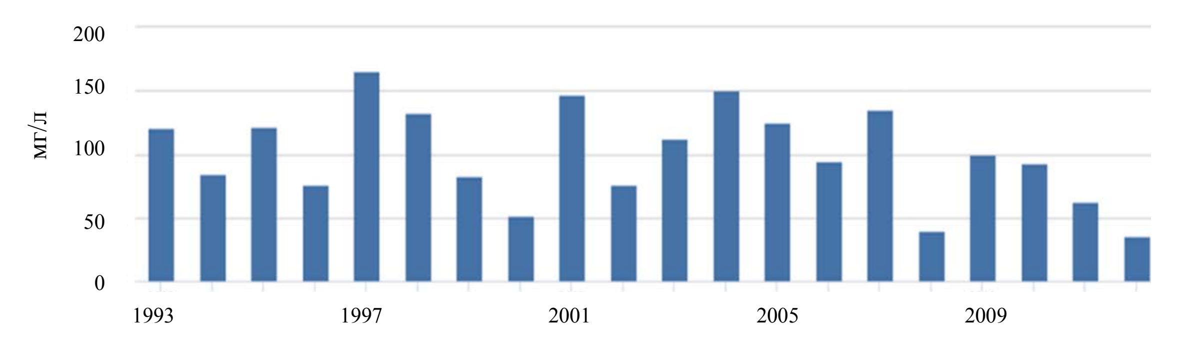


Рис. 3. Ряды многолетних наблюдений за стоком реки Дон (1993–2012 гг.): концентрация фосфора (PO_4)

[1] Экологический атлас. Черное и Азовское моря / НК «Роснефть» ; Арктический научный центр ; НИР. М., 2019. 464 с.

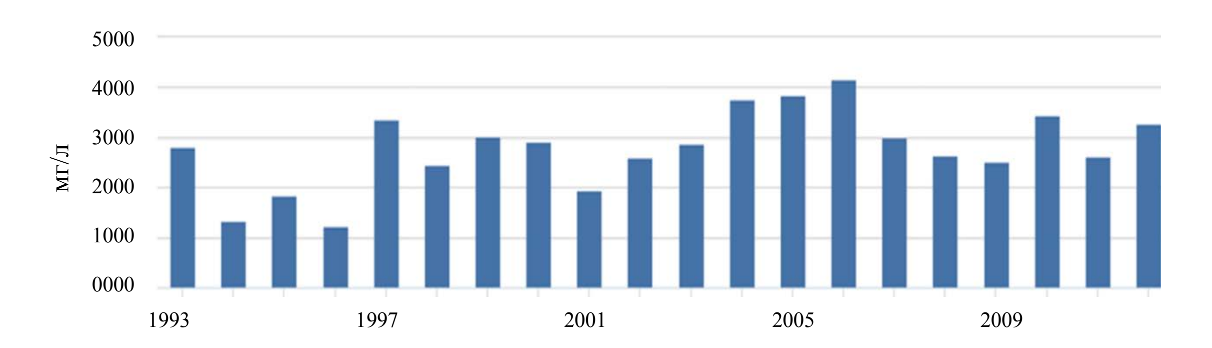


Рис. 4. Ряды многолетних наблюдений за стоком реки Дон (1993–2012 гг.): концентрация кремния (SiO_4)

Таблица 2

Результаты расчета статистических параметров данных натурных наблюдений

Показатель	$N\text{-}NH_4$	PO_4	SiO_4
Количество значений	20	20	20
Максимальное значение	403,9	165,0	4166,7
Минимальное значение	20,6	35,4	287,3
Среднее арифметическое значение	132,3	100,1	2648,1
Дисперсия	10362,5	1309,0	868441,9
Стандартное отклонение	101,8	36,2	931,9
Коэффициент асимметрии C_s	0,9	–0,1	–0,7
Коэффициент эксцесса C_e	0,2	–0,9	0,2
Коэффициент вариации C_v	0,8	0,4	0,4
Отношение C_s/C_v	1,2	–0,3	–2,0
Коэффициент автокорреляции	0,3	–0,1	0,1
Отношение Неймана	1,1	2,0	1,8

Исследование рядов многолетних наблюдений за стоком Дона позволяет сделать ряд выводов.

— Рассматриваемые концентрации питательных веществ обладают как положительной, так и отрицательной асимметрией.

— Случайные величины для азота и кремния смещены относительно центра распределения, о чем свидетельствует высокое значение коэффициента асимметрии.

— Большие значения дисперсий и среднеквадратических отклонений получены для всех биогенов.

— Коэффициенты автокорреляции малы, следовательно, для рядов натурных данных характерна сильная нелинейная тенденция.

— Вариация во всех рядах больше 20 %, следовательно, ряды сильно вариативны.

— Для азота очевидно наличие автокорреляционной связи по критерию Андерсона при количестве значений в выборке 20, так как коэффициент автокорреляции превышает 0,299 при уровне значимости 5%.

— Для азота очевидно наличие автокорреляции остатков по критерию Неймана при уровне значимости 5% для 20 наблюдений, т. к. отношение Неймана меньше 1,2.

— Фосфор и кремний не демонстрируют автокорреляционные связи, гипотезу об автокорреляции остатков отвергаем.

В результате статистического анализа натурных данных [14] можно сделать вывод об их сильной изменчивости. Это обусловлено стохастичностью поступления биогенных веществ со стоком Дона и существенно меняющимся объемом стока под воздействием природных и антропогенных факторов. Для использования натурных данных в модели (1)–(6) целесообразно учитывать сезонные изменения. Далее при моделировании будем рассматривать летний период.

Результаты численных экспериментов. Проведено численное моделирование решения задачи динамики фитопланктонных популяций в летнее время с учетом трансформации форм фосфора, азота и кремния на примере Азовского моря. Моделируемая область соответствует физическим размерам Азовского моря: длина — 355 км, ширина — 233 км, шаг по пространству в горизонтальных направлениях — 1000 м. На рис. 5 приведен спутниковый снимок Азовского моря, подтверждающий соответствие результатов работы

натурным данным. На снимке отчетливо видны распределения зеленых и сине-зеленых водорослей в области Таганрогского залива и диатомовых водорослей — в центральной части моря.



Рис. 5. Спутниковый снимок Азовского моря, сделанный с помощью спектрорадиометра с умеренным разрешением (MODIS) спутником NASA Aqua 31 июля 2004 года

В результате вычислительного эксперимента получены сеточные распределения концентраций основных популяций фитопланктона и питательных веществ в Азовском море (рис. 6). Период расчета — 30 суток. Этого достаточно для установления стационарных режимов в задачах динамики фитопланктона.

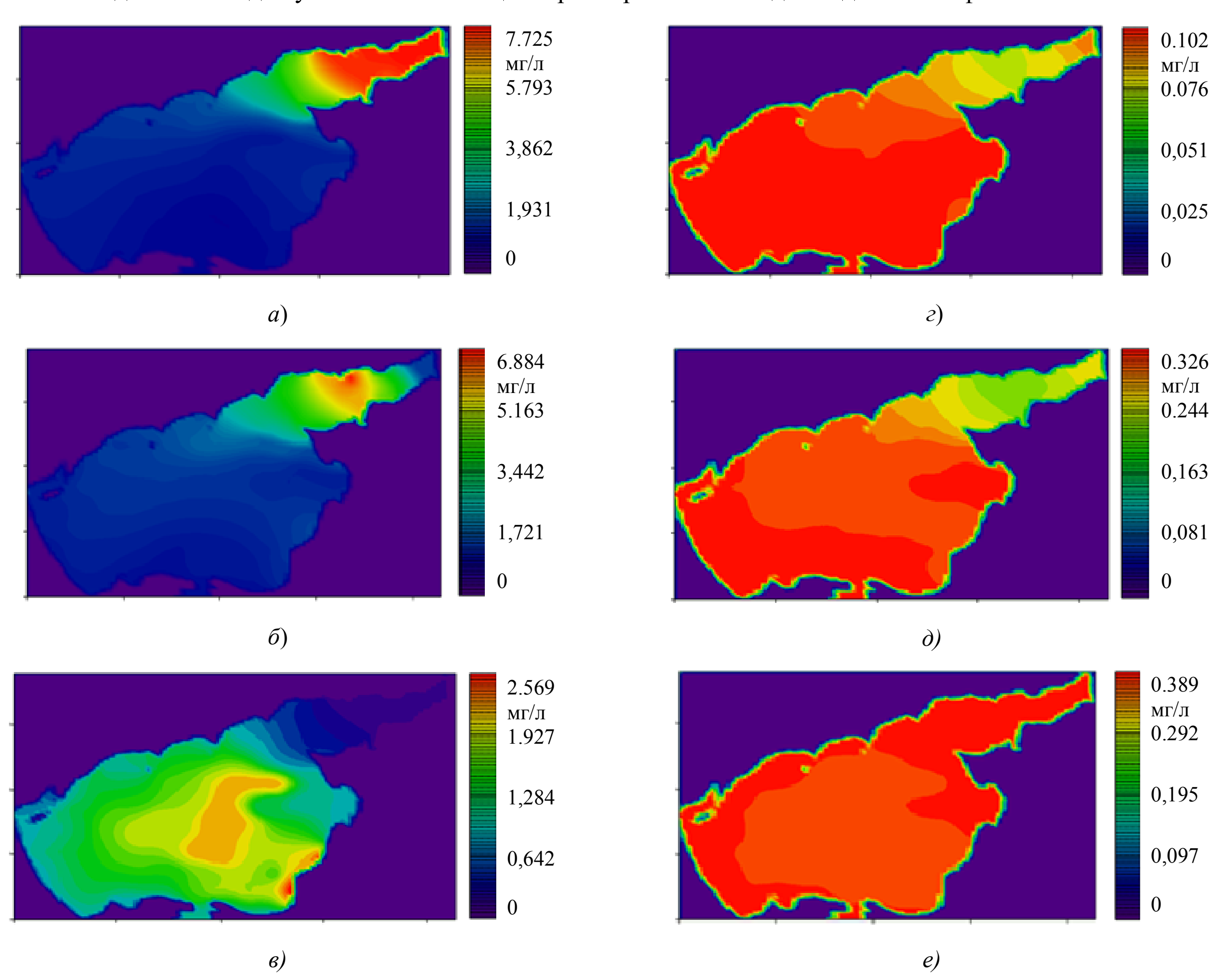


Рис. 6. Распределения концентраций: зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* (*а*); сине-зеленой водоросли *Aphanizomenon flos-aquae* (*б*); диатомовой водоросли *Sceletonema costatum* (*в*); фосфатов (*г*); нитратов (*д*); растворенного неорганического кремния (*е*)

Рисунки отражают динамику фитопланктонных популяций, циклы фосфора, азота и кремния. В процессе экскреции и отмирания фитопланктон выделяет фосфор в растворенной и взвешенной органических формах, затем в процессе фосфатофикации они переходят в неорганическую форму — фосфаты, которые потребляет фитопланктон. Также описан цикл азота: в процессе жизнедеятельности фитопланктон выделяет азот в органическом виде, который разлагается до аммиака. Аммиак в процессе нитрификации окисляется до нитритов, а затем до нитратов. Стоит отметить, что фитопланктон потребляет все три формы азота. Отмечено потребление и выделение кремния диатомовыми водорослями. Сравнение с результатами моделирования для многоводных периодов показывает, что в последние маловодные годы ареалы обитания зеленых и сине-

зеленых водорослей в области Таганрогского залива существенно (на многие километры) сместились в восточном направлении, ближе к Дону — источнику пресной воды.

Обсуждение и заключения. В работе приведена многовидовая математическая модель динамики фитопланктонных популяций, трансформаций форм биогенных веществ — соединений фосфора, азота, кремния. В модели учтено:

— влияние солености и температуры на развитие трех основных видов фитопланктона (зеленых, сине-зеленых и диатомовых водорослей);

— поглощение фитопланктоном фосфатов и форм азота,

— переход форм фосфора и азота из одной в другую,

— поглощение кремния диатомовыми водорослями,

— адвективное и микротурбулентное движение водной среды,

— стоки и источники на границе.

Для анализа натурных данных разработана и адаптирована методика статистического анализа многолетних рядов наблюдений концентраций биогенных веществ (фосфора, азота, их соединений и др.), которые поступают в море со стоком Дона. Статистический анализ данных многолетних наблюдений, в частности гидрохимических показателей стока Дона, стал базой для прогнозирования биогеохимических процессов с учетом движения водной среды, распределения температур и солености. Результаты численных экспериментов согласуются с данными космического зондирования Азовского моря, что является подтверждением предсказательной ценности применяемых моделей и методов их численной реализации. Сравнение распределений популяций зеленых и сине-зеленых водорослей в Таганрогском заливе для многоводных и маловодных периодов показывает, что ареалы их обитания в последние маловодные годы существенно (на многие километры) сместились в восточном направлении, ближе к Дону — источнику пресной воды.

Библиографический список

1. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / Г. Г. Матишов, С. Л. Дженюк, С. В. Бердников, Ю. М. Гаргопа. — Москва : Наука, 2006. — 304 с.

2. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. — Москва : Наука, 1982. — 319 с.

3. Математическое моделирование условий формирования заморов в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе / А. И. Сухинов, А. В. Никитина, А. Е. Чистяков, И. С. Семенов // Вычислительные методы и программирование. — 2013. — Т. 14, № 1. — С. 103–112.

4. Lewis, N. D. Multitrophic interactions in the sea: assessing the effect of infochemical-mediated foraging in a 1-D spatial model / N. D. Lewis, A. Morozov, M. N. Breckels [et al.] // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. — 2013. — Vol. 8(6) — P. 25–44.

5. Yakushev, E. V. Analysis of the water column oxic/anoxic interface in the Black and Baltic seas with a numerical model / E. V. Yakushev, F. Pollehne, G. Jost [et al.] // Marine Chemistry. — 2007. — Vol. 107 (3). — P. 388–410.

6. Сухинов, А. И. Прецизионные модели гидродинамики и опыт их применения в предсказании и реконструкции чрезвычайных ситуаций в Азовском море / А. И. Сухинов // Известия ТРТУ. — 2006. — № 3 (58). — С. 228–235.

7. Математическое моделирование гидродинамических процессов мелководных водоемов с учетом процессов переноса солей и тепла / А. Е. Чистяков, А. В. Никитина, Ю. В. Белова [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : сб. тр. VI междунар. конф. и молодеж. школы / Под ред. В. А. Соболева. — Самара : Изд-во Самар. нац. исслед. ун-та им. академика С. П. Королева, 2020. — С. 784–791.

8. Sukhinov, A. I. Reconstruction of 2001 ecological disaster in the Azov Sea on the basis of precise hydrophysics models / A. I. Sukhinov, A. A. Sukhinov // Parallel Computational Fluid Dynamics 2004. Multidisciplinary Applications. — London : Elsevier Science, 2005. — P. 231–238. DOI: 10.1016/B978-044452024-1/50030-0

9. Nikitina, A. Optimal control of sustainable development in biological rehabilitation of the Azov Sea / A. Nikitina, A. I. Sukhinov, G. A. Ugolnitskya [et al.] // Mathematical Models and Computer Simulations. — 2017. — Vol. 9 (1). — P. 101–107.

10. Sukhinov, A. I. Numerical modeling of ecologic situation of the Azov Sea with using schemes of increased order of accuracy on multiprocessor computer system / A. I. Sukhinov, A. E. Chistyakov, A. A. Semenyakin [et al.] // Computer Research and Modeling. — 2016. — Vol. 8(1). — P. 151–168.

11. Исследование стационарных решений задачи динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния / Ю. В. Белова, А. М. Атаян, А. Е. Чистяков, А. В. Стражко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 4–12.

12. Yakushev, E. Importance of the different manganese species in the formation of water column redox zones: Observations and modeling / E. Yakushev, S. Pakhomova, K. Sørenson [et al.] // Marine Chemistry. — 2009. — Vol. 117. — P. 59–70.

13. Sukhinov, A. I. Practical aspects of implementation of the parallel algorithm for solving problem of ctenophore population interaction in the Azov Sea / A. I. Sukhinov, A. V. Nikitina, A. E. Chistyakov [et al.] // Bulletin of the South Ural State University. (Computational Mathematics and Software Engineering). — 2018. — Vol. 7 (3). — P. 31–54. DOI: https://doi.org/10.14529/cmse180303

14. Коваленко, С. Н. Результаты статистической обработки натурной информации при биогенном загрязнении малых рек, принимающих стоки с мелиорируемых сельскохозяйственных территорий / С. Н. Коваленко // Природообустройство. — 2009. — № 4. — С. 73–77.

Поступила в редакцию 11.05.2020
Запланирована в номер 31.07.2020

Об авторах:

Сухинов Александр Иванович, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой «Математика и информатика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID: I-1091-2016, ScopusID: 8573972700, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5875-1523, sukhinov@gmail.com.

Белова Юлия Валериевна, ассистент кафедры «Математика и информатика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID: L-7893-2016, ScopusID: 57196457293, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2639-7451, yvbelova@yandex.ru.

Никитина Алла Валерьевна, ведущий научный сотрудник ООО «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров» (РФ, 347900, Россия, Ростовская область, г. Таганрог, пер. Итальянский, 106), ResearcherID: H-4941-2017, ScopusID: 57190226179, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7257-962X, nikitina.vm@gmail.com.

Атаян Ася Михайловна, ассистент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID: 57213156282, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4629-1002, atayan24@yandex.ru.

Заявленный вклад соавторов:

А. И. Сухинов — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Ю. В. Белова — формирование основной концепции, постановка цели и задач исследования, проведение вычислительного эксперимента, подготовка текста. А. В. Никитина — подготовка текста, формулирование выводов. А. М. Атаян — проведение вычислительного эксперимента, подготовка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.